

УДК 681.51:621.9.048

В. С. Антонюк, д-р техн. наук, Київ, Україна,  
Р. П. Гайдаш, С. О. Білокінь, канд. техн. наук,  
Ю.Ю. Бондаренко, канд. техн. наук, М.О. Бондаренко, канд. техн. наук,  
Черкаси, Україна

## **МОДИФІКАЦІЯ НАНОРЕЛЬЄФУ МЕТОДОМ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОЇ МІКРООБРОБКИ**

*Представлені результати мікрообробки електронним променем стрічкової форми поверхонь оптичних стекл K8, K108 з початковим нанорельєфом поверхні 15-22 нм після промислового шліфування та полірування. За результатами досліджень із застосуванням атомно-силової мікроскопії встановлено, що після електронно-променевої мікрообробки нанорельєф зменшився до значень 1,5...2,2 нм, що задовольняє вимогам до поверхонь оптичних інтегральних схем.*

*Ключові слова:* електронно-променева мікрообробка, оптичне скло, атомно-силовий мікроскоп

*Представлены результаты микрообработки электронным лучом ленточной формы поверхностей оптических стекл K8, K108 с начальным нанорельефом поверхностей 15...22 нм после промышленной шлифовки и полировки. По результатам исследований с применением атомно-силовой микроскопии установлено, что после электронно-лучевой микрообработки нанорельеф уменьшился до значений 1,5-2,2 нм, удовлетворяя требованиям к поверхностям интегральных схем.*

*Ключевые слова:* электронно-лучевая микрообработка, оптическое стекло, атомно-силовой микроскоп

*The article represents the results of ribbon beam electron ray micromachining of optical glasses K8 and K108 surfaces with the initial nanorelief surface of 15-22 nm after the industrial grinding and polishing. After the application of atomic force microscopy, it was investigated that a nanorelief diminished to the values of 1,5...2,2 nm after a micromachining. This fulfills the requirements to the board surfaces of the optical integrated schemes.*

*Keywords:* electron-beam micromachining, optical glass; atomic force microscope

**Актуальність.** Для виготовлення оптичних інтегральних схем (ОІС) та формування мікроелементів необхідного розміру та профілю на цих схемах, за останні десятиліття випробувані усі відомі матеріали аморфної, кристалічної, полікристалічної структури, а для їх поверхневої обробки використовувалися різні методи, у тому числі: промислові методи глибокого шліфування та полірування, загального шліфування і полірування, тощо.

Як показали дослідження, сучасним українським оптичним виробництвом не гарантується отримання на оптичному склі поверхонь, що задовольняли би вимогам, які висуваються до плат ОІС. При цьому, нанорельєф на промислово виготовлених пластинах перевищує величину у 5 нм, чим обмежує їх подальше використання в якості плат ОІС.

А вплив на поверхню оптичного матеріалу абразиву, миючих та

травильних розчинів на стадіях шліфування та полірування неминуче призводить до утворення хімічно-неоднорідного дефектного і тріщинуватого шарів, сукупна глибина яких може перевищувати десяті долі мікрометрів. Це, у багатьох випадках обмежує використання технологій електронної літографії та фотолітографії.

Проблема дотримання необхідного рівня нанорельєфу поверхневого шару оптичних матеріалів при виготовленні елементів нового покоління, підвищення продуктивності їх виготовлення є однією з найбільш актуальних в техніці та технології обробки оптичних матеріалів.

Одним із шляхів подолання цієї проблеми, є залучення нових інструментів для енергетичної мікрообробки оптичних поверхонь, у тому числі, і концентрованих потоків електронів.

Ефективність поверхневої обробки оптичного скла стрічковим електронним потоком вперше була показана в роботах В.М.Лісоченка [1].

В роботах [2, 3] показана можливість гнучкого керування процесом електронно-променевої обробки оптичного скла і оптичної кераміки шляхом оплавлення поверхні на глибину до 200 мкм. Авторами [4-6] підтверджена ефективність використання стрічкового електронного потоку при поверхневій обробці як оптичного, так і технічного скла.

Разом з тим, питання якісних змін нанорельєфу та дефектного шару оптичного скла силікатної групи від дії низькоенергетичного електронного потоку ( $E \leq 6$  кеВ) вивченими недостатньо та не встановлено взаємозв'язок між цими змінами і параметрами електронно-променевої мікрообробки.

Тому, **метою роботи** є визначення змін нанорельєфу поверхні оптичного скла від впливу низькоенергетичного електронного потоку та встановлення взаємозв'язку між розміром модифікованого нанорельєфу та параметрами електронно-променевої мікрообробки.

**Методика проведення експерименту.** Об'єкти, які оброблені електронним променем: плоскопаралельні диски (діаметром 20 мм, товщиною 2; 4; 6 мм) із скла оптичного безкольорового марок К8, К108 (ГОСТ 3514-76).

Дослідження об'єктів обробки здійснювалось із застосуванням наступних приладів і матеріалів: атомно-силовий мікроскоп (АСМ) "NT-206V" (виробник "Микротестмашины", м.Гомель, Білорусь) пінцет, ексикатор, шафа пилозахисна ШЗА, спирт етиловий, бязь технічна. Для візуалізації об'єкта дослідження при збільшенні до 100 разів використано оптичну камеру "Logitech", поле огляду якої становить  $1 \times 0,75$  мм<sup>2</sup>.

Схеми отримання нанорельєфу поверхні із застосуванням атомно-силовий мікроскопа при безконтактній (а) та при контактній (б) схемах роботи представлено на рис. 1.

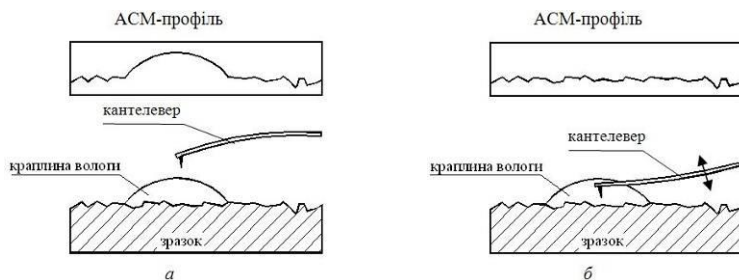


Рисунок 1 – Отримувані профілі поверхонь при безконтактній (а) та при контактній (б) схемах роботи атомно-силовий мікроскопа

Чутливим елементом мікроскопу є контелевер, відхилення якого при контакті з поверхнею визначається за допомогою лазерного променя. Позиціювання вимірюваної поверхні під контелевером здійснюється за допомогою високоточних крокових двигунів (у площині Х-У з кроком 2,5 мкм, вздовж осі Z з кроком 200 нм).

Профіль досліджуваної поверхні визначається шляхом сканування контелевера у площині Х-У на ділянці розміром 13×13 мкм з допомогою п'єзокерамічного сканера з кроком до 1 нм. Переміщення контелевера у вертикальній осі здійснюється п'єзотрубкою з кроком 0,02 нм у діапазоні 3 мкм. Одержання зображення мікрорельєфу оптичної поверхні проводили із застосування наступних режимів роботи АСМ: статичного (контактного), рис. 1,а та динамічного (безконтактного), рис. 1,б.

В динамічному режимі на контелевер накладаються коливання у вертикальній вісі з частотою від 10 Гц до 400 кГц. Головними перевагами даного режиму є значно підвищена чутливість вимірювальної системи (теоретично можливо досягти атомарної точності) та забезпечення механічної цілісності зонду та зразка.

На рис. 2. представлене зображення ділянки поверхні оптичного скла К8 з розташованою над нею вимірювальною системою з контелеверами для настроювання системи позиціонування АСМ.

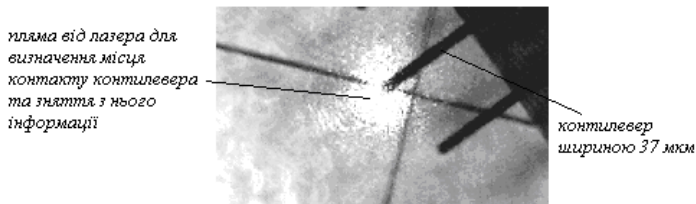


Рисунок 2 – Поверхня скла К8 з нанесеною за допомогою механічного різця сіткою (на знімку – перехрестя), NT-206V

Позиціонування кантелевера над поверхнею оптичного скла та подальше настроювання системи лазерний промінь – кантелевер відбувається у ручному режимі за допомогою вбудованої в пристрій АСМ довгофокусуючої камери „Logitech” з виведенням збільшеного у 150 разів зображення на дисплей ПК.

Як видно з рис. 2, правильне позиціонування кантелевера, що забезпечує найбільш повне та точне зняття інформації чутливою системою АСМ про топологію поверхні досягається при фокусуванні лазера фотодетектуючого пристрою на верхньому краю кантелевера.

Процес сканування завершується автоматично, після чого на моніторі комп’ютера отримували зображення поверхні. Для обробки та аналізу даних з мікрорельєфу використовували програма Surface v.6.2, що надає такі види інформації: тривимірна візуалізація поверхні; профілювання поверхні у необхідному перерізі; розподіл висот поверхні; кутова гістограма.

Середній час підготовки до роботи та сканування одного зразка складає 10...12 хвилин.

Використання методу атомно-силової мікроскопії дало можливість дослідити модифіковані електронним потоком поверхню та поверхневий шар скла К8 (рис. 3).

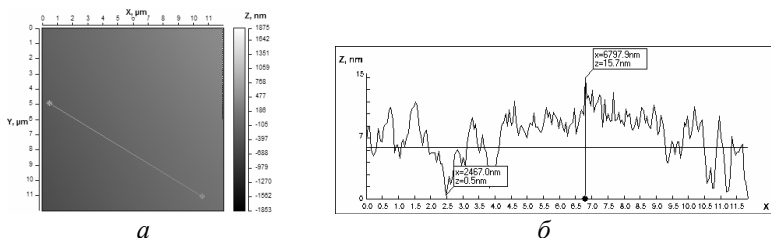


Рисунок 3 – Зовнішній вигляд (а) та нанорельєф вздовж лінії АВ (б) площадки поверхні (12×12 мкм) пластини із скла К8

із вплавленою електронним потоком металевою тонкою плівкою алюмінію

**Результати експерименту та їх обговорення.** Результати дослідження та порівняння нанорельєфу поверхні оптичного скла К8 після механічної обробки, лазерної та електронно-променевої мікрообробки із застосуванням сучасної автоматизованої системи керування комплексом для нанометричних досліджень показали перспективність застосування цього методу у інтегральній оптиці при виготовленні елементів мікро- та нанооптики [7].

За профілями наведеними на рис. 4, можна зробити висновок, що як після механічної (глибоке шліфування-полірування) (профіль 1, рис. 4.а), так і після лазерної мікрообробки (профіль 3, рис. 4.б) поверхня пластини з оптичного скла має характерний нанорельєф, який набагато перевищує

допустиме значення середньоарифметичної нанонерівності, що становить 5 нм.

Це вказує на неможливість використання цих методів поверхневої мікрообробки при виготовленні плат ОІС.

В той же час, нанорельєф поверхні, отриманий після електронно-променевої мікрообробки (профіль 2, рис. 4.а, б) вказує на високу точність та однорідність утворюваної поверхні, а використання даного методу дозволяє отримувати якісні поверхні з гарантованими рівнями чистоти та мікронерівностей, значення яких не перевищує 5 нм.

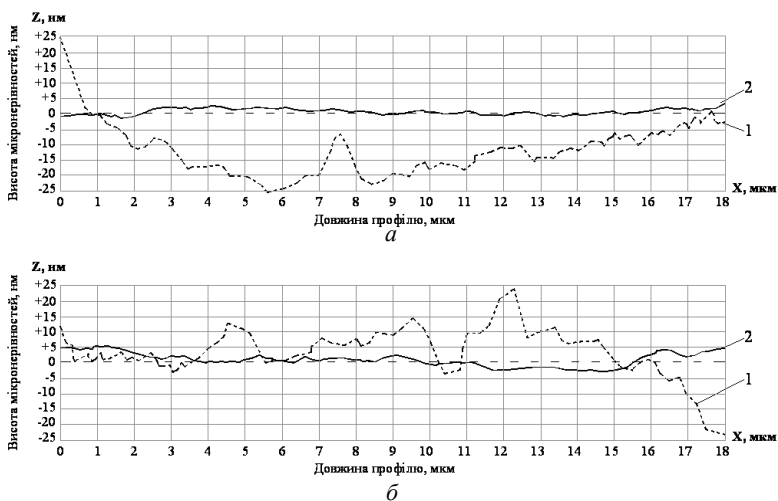


Рисунок 4 – Характерний нанорельєф поверхні оптичного скла К8 після механічної (1), електронно-променевої (2) та лазерної (3) обробки. NT-206V

Подальші дослідження нанорельєфу поверхні виробів (на прикладі круглих пластин діаметром 20 мм і товщиною 2 мм; оптичне скло К8) дозволили встановити залежність середньоарифметичної нанонерівності  $Ra$  від питомої потужності електронного потоку  $P_{\text{пот}}$  (а) та від швидкості електронного потоку  $V_{\text{пот}}$  (б), рис. 5.

Як можна бачити із залежностей наведених на рис. 5. а, б, за технологічними режимами описаними в роботах [8, 9], збільшення питомої потужності електронного потоку до  $300 \text{ Вт/см}^2$  для швидкостей електронного потоку порядку  $1 \text{ см/с}$  та до питомої потужності електронного потоку  $750 \text{ Вт/см}^2$  для швидкостей електронного потоку  $8 \text{ см/с}$  веде до зменшення середньоарифметичної нанонерівності поверхні нижче допустимого значення 5 нм.

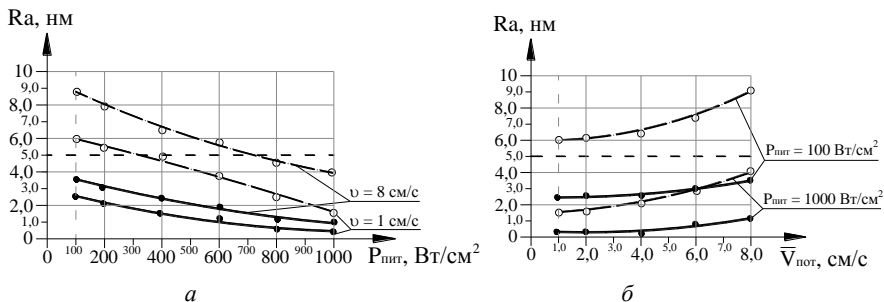


Рисунок 5 – Залежність середньоарифметичної нерівності нанорельєфу  $R_a$  від питомої потужності електронного потоку  $P_{\text{пит}}$  (а) та швидкості електронно-променевої мікрообробки  $V_{\text{пот}}$  (б):  
 ○ – за роботами [8, 9]; ● – за вдосконаленою технологією;  
 --- гранично допустимі значення нанорельєфу на поверхнях для ОІС

При цьому, за технологічними режимами отриманими для вдосконаленої авторами технологією для швидкостей електронного потоку 1...8 см/с величина середньоарифметичних нанонерівностей для усього діапазону значень питомої потужності (100...1000 Вт/см<sup>2</sup>) становить 2,2...1,5 нм.

**Висновки.** В процесі виконання наукових досліджень, визначені зміни нанорельєфу поверхні оптичного скла від дії низькоенергетичного електронного потоку та досліджено взаємозв'язок між розміром модифікованого нанорельєфу та параметрами електронно-променевої мікрообробки.

Встановлено, що в результаті електронно-променевої мікрообробки нанорельєф поверхонь виробів із оптичного скла К8, К108 зменшується з 4...9 нм до 1,5...2,2 нм. Це досягається шляхом керування швидкістю та питомою потужністю електронного потоку.

Отримані поверхні оптичного скла К8, К108 з нанорельєфом 1,5...2,2 нм відповідають вимогам, що висуваються сучасним оптичним виробництвом до плат оптичних інтегральних схем.

**Список використаних джерел:** 1. Лисоченко В. Н. Разработка элементов интегрально-оптических схем новыми методами на основе электронно-лучевой обработки / В. Н. Лисоченко, Г. В. Канашиевич, В.А. Ващенко и др. – отчет по НИР Черкасского филиала КПИ. – Черкассы. – 1993. – 205с. 2. Канашиевич Г.В. Технологічні можливості електронно-променевої обробки оптичного скла // Вісник ЧПІ. – 1998. – №3. – С.48-55. 3. Канашиевич Г.В., Котельников Д.І., Ващенко В.А. Спеціальні методи обробки оптичного скла / Під ред. професора Д.І. Котельникова. – Чернівці: “Сіверська думка”, 2002. – 215 с. 4. Бондаренко М.А. Исследование микрогеометрии поверхности оптических стекол после электронной и после лазерной обработки методом атомно-силовой микроскопии / М.А.Бондаренко, Ю.Б.Шевченко, В.П.Бойко, Ю.И.Коваленко [и др.] // Методологические аспекты сканирующей зондовой микроскопии: VII Междунар. сем.,

1–3 ноября 2006 г: тезисы докл. – Минск, 2006. – С. 139-142. 5. Коваленко Ю.І. Модифікація нанорельєфу на оптичному склі електронно-променевою мікрообробкою / Ю.І.Коваленко, М.О.Бондаренко, І.В.Яценко, М.П.Рудь [та ін.] // Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. – Черкаси: ЧДТУ, 2012. – №1 – С. 104-107. 6. Антонюк В.С. Підвищення мікротвердості та зносостійкості поверхонь елементів виробів з оптичного скла мікрообробкою електронним потоком у вакуумі / В.С.Антонюк, Ю.І.Коваленко, Ю.Ю.Бондаренко, М.О.Бондаренко // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. – Житомир: ЖДТУ, 2015. – №1 (72) – С. 3-8. 7. Бондаренко М.О. Автоматизований комплекс для нанометричних досліджень / М.О.Бондаренко, Ю.Ю.Бондаренко // Фізика, електроніка, електротехніка (ФЕЕ-2016): наук.-техн. конф., 18-22 квітня 2016 р: тези доп. – Суми: СумДУ, 2016. – С. 200. 8. Ващенко В.А. Использование ленточного электронного луча в технологии получения элементов интегральной оптики / В.А.Ващенко, Г.В.Канашевич // Деп. ВИНТИ "Депонированные научные работы" № 11. – 1993. – 22 с. 9. Бондаренко М.О. Оптимізація параметрів стрічкового електронного потоку за допомогою зон термічного впливу / М.О.Бондаренко, В.А.Ващенко, Г.В.Канашевич // Тези доповідей першої Міжнародної НТК "Машинобудування та металообробка – 2003". – Кіровоград, 17-19 квітня 2003. – С.15-16.

**Bibliography (transliterated):** 1. Lisochenko V.N., Kanashevich G.V., Vashhenko V.A. i dr. Razrabotka jelementov integral'no-opticheskikh shem novymi metodami na osnove jelektronno-luchevoj obrabotki. – Otchet po NIR Cherkasskogo filiala KPI. – Cherkassy. – 1993. – 205s. 2. Kanashevich G.V. Tehnologichni mozhlivosti elektronno-promenevoi obrobki optichnogo skla. – Visnik ChITI. – 1998. – №3. – S.48-55. 3. Kanashevich G.V., Kotel'nikov D.I., Vashhenko V.A. Special'ni metodi obrobki optichnogo skla / Pid red. profesora D.I. Kotel'nikova. – Chernigiv: "Sivers'ka dumka", 2002. – 215 s. 4. Bondarenko M.A., Shevchenko Ju.B., Bojko V.P., Kovalenko Ju.I. i dr. Issledovanie mikrogeometrii poverhnosti opticheskikh stekol posle jelektronnoj i posle lazernoj obrabotki metodom atomno silovoj mikroskopii. – Metodologicheskie aspekty skanirujushhej zondovoj mikroskopii: VII Mezhdunar. sem., 1–3 nojabrja 2006 g: tezisy dokl. – Minsk, 2006. – S. 139-142. 5. Kovalenko Ju.I., Bondarenko M.O., Yatsenko I.V., Rud' M.P. ta in. Modifikacija nanorel'efu na optichnomu skli elektronno-promenevoju mikroobrobkoju. – Visnik Cherkas'kogo derzhavnogo tehnologichnogo universitetu. Serija: Tehnichni nauki. – Cherkasi: ChDTU, 2012. – №1 – S. 104-107. 6. Antonjuk V.S., Kovalenko Ju.I., Bondarenko Ju.Ju., Bondarenko M.O. Pidvishennja mikrotverdosti ta znosostijkosti poverhon' elementiv virobiv z optichnogo skla mikroobrobkoju elektronnim potokom u vakuumi. – Visnik Zhitomir'skogo derzhavnogo tehnologichnogo universitetu. Serija: Tehnichni nauki. – Zhitomir: ZhDTU, 2015. – №1 (72) – S. 3-8. 7. Bondarenko M.O., Bondarenko Ju.Ju. Avtomatizovaniy kompleks dlja nanometrichnih doslidzhen'. – Fizika, elektronika, elektrotehnika (FEE-2016): nauk.-tehn. konf., 18-22 kvitnja 2016 r: tezi dop. – Sumi: SumDU, 2016. – S. 200. 8. Vashhenko V.A., Kanashevich G.V. Ispol'zovanie lentochnogo jelektronnogo луча v tehnologii poluchenija jelementov integral'noj optiki. – Dep. VINITI "Deponirovannye nauchnye raboty" № 11. – 1993. – 22 s. 9. Bondarenko M.O., Vashhenko V.A., Kanashevich G.V. Optimizacija parametriv strichkovogo elektronno potoku za dopomogoj z on termichnogo vplivu. – Tezi dopovidej pershoj Mizhnarodnoї NTK "Mashinobuduvannja ta metaloobrobka – 2003". – Kirovograd, 17-19 kvitnja 2003. – S.15-16.